

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-350239

(43)Date of publication of application : 15.12.2000

(51)Int.Cl.

H04N 17/00

G06T 7/20

H04N 5/228

H04N 5/232

H04N 13/02

(21)Application number : 11-161217

(71)Applicant : SONY CORP

(22)Date of filing : 08.06.1999

(72)Inventor : IWAI YOSHIKI

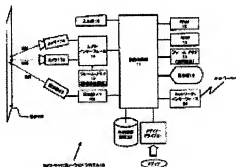
ASHIGAHARA TAKAYUKI

(54) CAMERA CALIBRATION DEVICE AND METHOD, IMAGE PROCESSING UNIT AND METHOD, PROGRAM SERVING MEDIUM AND CAMERA

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To stably estimate a conversion parameter with high accuracy for a camera of a type that picks up an image of an object and outputs image data by calculating the conversion parameter on the basis of the cross reference of pixels between the picked-up picture and a reference picture.

SOLUTION: An arithmetic processing section 11 executes various application programs under the control of an operating system. First the processing section 11 executes a prescribed computer graphic processing to generate a reference picture consisting of geometrical shaped defined patterns and stores the reference picture to a frame memory 14. Then the processing section 11 calculates a conversion parameter of a camera on the basis of a cross reference of pixels between the picked-up picture by the camera and the reference picture. In the case of calculating the parameter, the processing section 11 conducts picture matching processing between the two pictures. The cross reference of pixels among a plurality of picked-up pictures picked up by the camera is obtained by using the



calculated conversion parameter. For example, distance is measured on the basis of the cross reference of view points in both a standard camera 17A and a reference camera 17B.

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード [*] (参考)
H 0 4 N	17/00	H 0 4 N	17/00
G 0 6 T	7/20		5/228
H 0 4 N	5/228		5/232
	5/232		13/02
	13/02	G 0 6 F	15/70
			4 0 0
		審査請求	未請求
		請求項の数	38
		OL	(全 19 頁)

(21) 出願番号	特願平11-161217	(71) 出願人	000002185 ソニー株式会社 東京都品川区北品川6丁目7番35号
(22) 出願日	平成11年6月8日(1999. 6. 8)	(72) 発明者	岩井 嘉昭 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内
		(72) 発明者	芦ヶ原 隆之 東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内
		(74) 代理人	100101801 弁理士 山田 英治 (外2名)

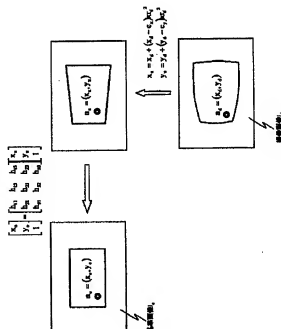
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 カメラ・キャリブレーション装置及び方法、画像処理装置及び方法、プログラム提供媒体、並びに、カメラ

(57) 【要約】

【課題】 安定且つ高精度にパラメータ推定を行うことができる、優れたカメラ・キャリブレーション装置及び方法を提供する。

【解決手段】 幾何形状が既知のパターンをカメラで撮像した撮像画像を画像入力して、フレーム・バッファに一時格納する。また、撮像画像とは幾何形状の定義と一義的なパターンを持つ基準画像をCG技術などを用いて生成し、他のフレーム・バッファに保持する。得られた基準画像と撮像画像間で、画像合わせ込み (Image Registration) を行い、輝度の誤差を最小化することで、パラメータ算出を行うことができる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 カメラの特性を表すパラメータを算出するカメラ・キャリブレーション装置において、幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力手段と、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持手段と、前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出手段と、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項2】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段を含み、

前記画像保持手段は、前記画像生成手段によって生成された画像を保持することを特徴とする請求項1に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項3】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段と、該生成された基準画像を略無地の面上に投影する投光手段とを含み、

前記画像入力手段は、前記投光手段による投影画像をカメラで撮像した撮像画像を入力することを特徴とする請求項1に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項4】 前記変換パラメータ算出手段は、撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとることを特徴とする請求項1に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項5】 前記変換パラメータ算出手段は、射影変換パラメータを導出するとともに、該射影変換パラメータを用いて撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとり、両画像の対応する画素間の輝度誤差を画像全体で最小化することを特徴とする請求項4に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項6】 前記変換パラメータ算出手段は、カメラによる撮像時に生じる前記撮像画像の歪み要因を表す歪みパラメータを導出するとともに、該歪みパラメータを用いて歪みを除去した撮像画像を射影変換して、前記基準画像との対応をとることを特徴とする請求項5に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項7】 前記変換パラメータ算出手段は、前記撮像画像の輝度値に応じて前記基準画像の輝度値を補正することを特徴とする請求項1に記載のカメラ・キャリブレーション装置。

【請求項8】 前記変換パラメータ算出手段は、撮像画像中において輝度値が略同一な領域を抽出して該領域の輝度値の平均値を求め、基準画像中の対応画素の輝度値を該平均値で置き換えることによって補正することを特徴とする請求項7に記載のカメラ・キャリブレーション

装置。

【請求項9】 カメラの特性を表すパラメータを算出するカメラ・キャリブレーション方法において、幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力ステップと、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持ステップと、前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出ステップと、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項10】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成ステップを含み、

前記画像保持ステップは、前記画像生成ステップによって生成された画像を保持することを特徴とする請求項9に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項11】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成ステップと、該生成された基準画像を略無地の面上に投影する投光ステップとを含み、

前記画像入力ステップは、前記投光ステップによる投影画像をカメラで撮像した撮像画像を入力することを特徴とする請求項9に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項12】 前記変換パラメータ算出ステップは、撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとることを特徴とする請求項9に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項13】 前記変換パラメータ算出ステップは、射影変換パラメータを導出するとともに、該射影変換パラメータを用いて撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとり、両画像の対応する画素間の輝度誤差を画像全体で最小化することを特徴とする請求項12に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項14】 前記変換パラメータ算出ステップは、カメラによる撮像時に生じる前記撮像画像の歪み要因を表す歪みパラメータを導出するとともに、該歪みパラメータを用いて歪みを除去した撮像画像を射影変換して、前記基準画像との対応をとることを特徴とする請求項13に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項15】 前記変換パラメータ算出ステップは、前記撮像画像の輝度値に応じて前記基準画像の輝度値を補正することを特徴とする請求項9に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項16】 前記変換パラメータ算出ステップは、撮像画像中において輝度値が略同一な領域を抽出して該領域の輝度値の平均値を求め、基準画像中の対応画素の輝度値を該平均値で置き換えることによって補正するこ

とを特徴とする請求項15に記載のカメラ・キャリブレーション方法。

【請求項17】 カメラによる複数の撮像画像を処理するための画像処理装置であって、

幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力手段と、

前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持手段と、

前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出手段と、

該算出された変換パラメータを用いて、前記カメラが撮像した複数の撮像画像間における画素の対応関係を求める演算手段と、を具備することを特徴とする画像処理装置。

【請求項18】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段を含み、前記画像保持手段は、前記画像生成手段によって生成された画像を保持することを特徴とする請求項17に記載の画像処理装置。

【請求項19】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段と、該生成された基準画像を略無地の面上に投影する投光手段とを含み、

前記画像入力手段は、前記投光手段による投影画像をカメラで撮像した撮像画像を入力することを特徴とする請求項17に記載の画像処理装置。

【請求項20】 前記変換パラメータ算出手段は、撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとることを特徴とする請求項17に記載の画像処理装置。

【請求項21】 前記変換パラメータ算出手段は、射影変換パラメータを導出するとともに、該射影変換パラメータを用いて撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとり、両画像の対応する画素間の輝度誤差を画像全体で最小化することを特徴とする請求項20に記載の画像処理装置。

【請求項22】 前記演算手段は、前記カメラが撮像した2枚の撮像画像に関して、一方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換と、他方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換の逆変換とを用いて座標変換することにより、該2枚の撮像画像間の対応関係を求めることを特徴とする請求項21に記載の画像処理装置。

【請求項23】 前記変換パラメータ算出手段は、カメラによる撮像時に生じる前記撮像画像の歪み要因を表す歪みパラメータを導出するとともに、該歪みパラメータを用いて歪みを除去した撮像画像を射影変換して、前記基準画像との対応をとることを特徴とする請求項22に記載の画像処理装置。

【請求項24】 前記変換パラメータ算出手段は、前記撮像画像の輝度値に応じて前記基準画像の輝度値を補正することを特徴とする請求項17に記載の画像処理装置。

【請求項25】 前記変換パラメータ算出手段は、撮像画像中において輝度値が略同一な領域を抽出して該領域の輝度値の平均値を求め、基準画像中の対応画素の輝度値を該平均値で置き換えることによって補正することを特徴とする請求項24に記載の画像処理装置。

【請求項26】 前記画像入力手段は、互いに所定の位置関係を持つ複数のカメラで撮像された複数の撮像画像を入力することを特徴とする請求項17に記載の画像処理装置。

【請求項27】 カメラによる複数の撮像画像を処理するための画像処理方法であって、幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力ステップと、

前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持ステップと、

前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出ステップと、

該算出された変換パラメータを用いて、前記カメラが撮像した複数の撮像画像間における画素の対応関係を求める演算ステップと、を具備することを特徴とする画像処理方法。

【請求項28】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成ステップを含み、

前記画像保持ステップは、前記画像生成ステップによって生成された画像を保持することを特徴とする請求項27に記載の画像処理方法。

【請求項29】 さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成ステップと、該生成された基準画像を略無地の面上に投影する投光ステップとを含み、

前記画像入力ステップは、前記投光ステップによる投影画像をカメラで撮像した撮像画像を入力することを特徴とする請求項27に記載の画像処理方法。

【請求項30】 前記変換パラメータ算出ステップは、撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとることを特徴とする請求項27に記載の画像処理方法。

【請求項31】 前記変換パラメータ算出ステップは、射影変換パラメータを導出するとともに、該射影変換パラメータを用いて撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとり、両画像の対応する画素間の輝度誤差を画像全体で最小化することを特徴とする請求項30に記載の画像処理方法。

【請求項32】 前記演算ステップは、前記カメラが撮

像した2枚の撮像画像に関して、一方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換と、他方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換の逆変換を用いて座標変換することにより、該2枚の撮像画像間の対応関係を求めることを特徴とする請求項31に記載の画像処理方法。

【請求項33】 前記変換パラメータ算出ステップは、カメラによる撮像時に生じる前記撮像画像の歪み要因を表す歪みパラメータを導出するとともに、該歪みパラメータを用いて歪みを除去した撮像画像を射影変換して、前記基準画像との対応をとることを特徴とする請求項32に記載の画像処理方法。

【請求項34】 前記変換パラメータ算出ステップは、前記撮像画像の輝度値に応じて前記基準画像の輝度値を補正することを特徴とする請求項27に記載の画像処理方法。

【請求項35】 前記変換パラメータ算出ステップは、撮像画像中において輝度値が略同一な領域を抽出して該領域の輝度値の平均値を求め、基準画像中の対応画素の輝度値を該平均値で置き換えることによって補正することを特徴とする請求項34に記載の画像処理方法。

【請求項36】 前記画像入力ステップは、互いに所定の位置関係を持つ複数のカメラで撮像された複数の撮像画像を入力することを特徴とする請求項27に記載の画像処理方法。

【請求項37】 カメラの特性を表すパラメータを算出するカメラ・キャリブレーションをコンピュータ・システム上で実行せしめるためのコンピュータ・プログラムを有形的且つコンピュータ可読な形式で提供するコンピュータ可読プログラム提供媒体であって、前記コンピュータ・プログラムは、

幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力ステップと、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持ステップと、

前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出ステップと、を含むことを特徴とするプログラム提供媒体。

【請求項38】 撮像画像を入力する画像入力手段と、幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像生成手段と、

前記幾何形状が定義済みのパターンを前記画像入力手段において入力した撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出手段と、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーションを行うことが可能なカメラ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、カメラの特性を表すパラメータを算出するカメラ・キャリブレーション方

法及び装置に係り、特に、対象物を撮像して電子的な画像データを出力するタイプのカメラに対してパラメータ算出を行うカメラ・キャリブレーション方法及び装置に関する。

【0002】更に詳しくは、本発明は、1枚の撮像画像を基に安定且つ高精度にパラメータ推定を行うカメラ・キャリブレーション方法及び装置に関する。

【0003】

【従来の技術】 昨今の画像処理技術の発展に伴い、高性能で且つ強力な演算能力を持つ汎用コンピュータ・システムが、各種研究機関や企業内のオフィス、一般家庭へと広汎に普及してきている。また、コンピュータの適用分野も拡大し、コンピュータ・データのみならず、画像や音声などの様々のデータも電子化され、コンピュータ上で扱われるようになってきた。例えば、デジタル・カメラなどの撮像手段により捕捉されてコンピュータ内に取り込まれた電子的な画像データは、コンピュータ資源を用いて画像合成や画像変形などの様々な加工処理を行うことができる。

【0004】実在するカメラの多くは、ピンホールカメラ・モデルによる中心投影を行う。中心投影とは、投影中心Cと3次元物体表面の点Pとを結ぶ直線（「視線」とも言う）とカメラの投影スクリーンとの交点に物体表面の点Pの色濃度値を配置していくことで、投影画像を形成する。中心投影では、同じ大きさの物体であっても、カメラの投影中心Cに近づくにつれて大きな像として投影され、逆に、投影中心Cから遠ざかるにつれて小さく投影される性質を持つ。

【0005】また、撮像対象の正面に対して斜め方向から撮像した画像は、正面に正対した位置から撮像した画像を射影変換した射影画像となることは、幾何学的に明らかである。正面画像を射影変換行列Hによって射影変換することで射影画像が得られるということは、画像処理の技術分野において広く知られている。例えば、正面画像がデジタル・カメラにより捕捉された電子的な画像データであれば、捕捉した正面画像を、コンピュータ資源を用いて射影変換することによって、任意の方向（視線）から撮像したに等しい射影画像を比較的高速且つ容易に計算して求めることができる。例えば、金谷健一著の「画像理解」（森北出版、1990）には、元画像を射影変換行列によって別の角度から見える画像に変換できる点が記載されている。

【0006】射影変換に関する幾何学的な性質は、例えば、「ステレオ法」に基づく対象物の距離測定方法にも適用することができる。ここで言うステレオ法とは、所定の位置関係を持つ複数の視点（投影中心）から撮像した画像を用いて、シーンスなわち撮像画像中の各点と投影中心との距離を、いわゆる「三角測量」の原理により測定する方法のことである。

【0007】本明細書中では、説明の便宜上、2つの視

点すなわち2個のカメラのみを用いてステレオ法を行うこととする。1つのカメラは基準カメラとして使用され、正面と正対した位置から対象物を撮像して、基準画像を出力する。また、他方のカメラは参照カメラとして使用され、斜め方向から対象物を撮像して、参照画像を出力する。図10は、撮像対象に対する基準カメラと参照カメラの配置を模式的に示しており、また、図11には、略正方形のパターンを基準カメラと参照カメラの各々によって撮像した場合の基準画像と参照画像を模式的に示している。

【0008】図10に示すように、撮像対象となる平面上の点Pと基準カメラの投影中心C_bとを結ぶ直線と、基準カメラの投影スクリーンS_bとの交点n_bに、点Pが観察される。点Pと基準カメラの投影中心C_bとを結ぶ直線は、基準カメラの視線である。また、点Pと参照カメラの投影中心C_rとを結ぶ直線と参照カメラの投影スクリーンS_rとの交点n_rに、点Pが観察される。点Pと参照カメラの投影中心C_rとを結ぶ直線は、参照カメラの視線である。

【0009】基準カメラの視線を射影変換すると、参照カメラの視線となる。射影変換は、射影変換行列Hによって記述される。また、基準カメラの視線は、参照カメラの投影スクリーン上では直線として観察されるが、この直線のことを「エビボラー・ライン」と呼ぶ。

【0010】また、図11に示すように、略正方形のパターンに正対する基準カメラで撮像した撮像画像は正方形となる。これに対し、このパターンを斜視する参照カメラで撮像した画像は、視点からの距離が長い辺が縮小される結果として、台形状として現れる。これは、同じ大きさの物体であっても、カメラの投影中心Cに近づくにつれて大きな像として投影され、逆に、投影中心Cから遠ざかるにつれて小さく投影されるという、中心投影の基本的性質に依拠する。

【0011】上述したように、参照カメラの撮像画像I_rは、基準カメラの撮像画像I_bを射影変換した画像である。すなわち、基準カメラの撮像画像I_b中の点n_b(x_b, y_b)と、これに対応する参照カメラの撮像画像I_r中の点n_r(x_r, y_r)の間には、以下の式が成立する。但し、両式中のHは3×3射影変換行列である。

【0012】

【数1】

$$n_r = H \cdot n_b$$

【0013】射影変換行列Hは、カメラの内部パラメータ及び外部パラメータ、平面の方程式を暗黙的に含んだ行列であり、また、スケール因子に自由度が残るので、8自由度を有する。なお、金谷健一著の「画像理解」(森北出版、1990)には、基準画像と参照画像間において、射影変換により互いの対応点を求めることができるということが記載されている。

【0014】基準カメラの視線は、参照カメラのカメラの投影スクリーンS_r上では「エビボラー・ライン」と呼ばれる直線として現れる(前述及び図10を参照のこと)。基準カメラの視線上に存在する点Pは、点Pの奥行き、すなわち基準カメラとの距離の大小に拘らず、基準カメラの投影スクリーンS_b上では同じ観察点n_b上に現れる。これに対し、参照カメラの投影スクリーンS_r上における点Pの観察点n_rは、エビボラー・ライン上で基準カメラと観察点Pとの距離の大小に応じた位置に現れる。

【0015】図12には、エビボラー・ラインと、参照カメラの投影スクリーンS_r上における観察点n_rの様子を図解している。図面に示すように、点Pの位置がP₁, P₂, P₃へと変化するに従って、参照画像中の観察点はn_{r1}, n_{r2}, n_{r3}へとシフトする。言い換えれば、エビボラー・ライン上の位置が観察点Pの奥行きに相当する誤である。

【0016】以上の幾何光学的性質を利用して、基準カメラの観察点n_bに対応する観察点n_rをエビボラー・ライン上で探索することにより、点Pの距離を同定することができる。これが「ステレオ法」の基本原理である。

【0017】しかしながら、撮像対象を実写した正画像像を基にして斜視画像を生成したり、あるいは、ステレオ法に基づいて複数台のカメラによる複数の画像から物体の距離を計測することは、カメラが持つ撮像光学系が理論と完全に一致する特性を持っていることを前提としている。このため、実写により取得した画像に対して所定の補正を施す必要がある。例えば、カメラのレンズは一般に歪みパラメータを有し、観察点は理論上の点から変位した位置に結像される。したがって、カメラ特有のパラメータを算出し、射影変換に際してこのパラメータに従った画像データの補正を行わなければ、正画像から正確な射影画像を得ることができず、また、ステレオ法により正確な奥行き計測を行うことができない。

【0018】カメラが持つパラメータは、レンズの歪みパラメータの他、カメラ特性をあらわす内部パラメータ、カメラの3次元位置を示す外部パラメータに区別される。カメラのパラメータを算出する方法のことを、一般に、「カメラ・キャリブレーション」と呼ぶ。カメラ・キャリブレーションのための手法は、従来から数多く提案されているが、未だ確立されたものがないのが現状である。

【0019】最も一般的なカメラ・キャリブレーション方法は、3次元空間中の位置が既知である複数の参照点からなる校正パターンを撮像して、全てのカメラ・パラメータ、すなわち内部パラメータ、外部パラメータ、歪みパラメータを同時に算出する方法である。例えば、Roger Y. Tsai著の論文「An Efficient and Accurate Camera

Calibration Technique for 3D Machine Vision " (1986, IEEE) には、当該手法について記載している。

しかしながら、この方法を実行するためには、正確な参照点が描かれた校正パターンを用意する必要がある。さらに、参照点を正確に位置決めする機構も必要である。

【0020】また、他の一般的なカメラ・キャリブレーション方法として、直線的な特徴を持つ物体（例えば、棒や立方体など）を撮像する方が挙げられる。この方法によれば、撮像した画像から物体上の各点を抽出し、その点群からなる直線までの距離の誤差を最小にすることで直線に当てはめて、歪み量を計算することができる。しかしながら、この方法による場合、撮像画像から点を抽出する際に生じる誤差が直線近似、最終的には歪み量の計算に影響を及ぼすという問題がある。このため、安定且つ正確にパラメータを求めるためには、様々な方向性を持つ直線群を複数撮像する必要があり、作業が複雑化し計算量も増大する。

【0021】また、一般シーンを撮像した画像を用いてカメラ・キャリブレーションを行うという方法もある。例えば、Frederic Dervay 外著の論文 "Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environment" や、G. P. Stein 著の論文 "Lens Distortion Calibration Using Point Correspondences" には当該手法について記載している。しかしながら、これらの文献に記載のキャリブレーション方法では、撮像画像から直線群の抽出が必要であったり、取得した2枚以上の撮像画像に対して対応点を決定する必要があるため、現状の技術水準ではパラメータ推定を安定に行うことは難しい。

【0022】また、上述した各方法はいずれも、局所的な特徴点を抽出してパラメータ算出を行うため、必然的に抽出誤差を含んでしまう。言い換えれば、複数枚の画像を撮像するなどしてパラメータ推定の安定化を図る必要があるとある。

【0023】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、対象物を撮像して電子的な画像データを出し出すタイプのカメラに対して、安定且つ高精度にパラメータ推定を行うことができる、優れたカメラ・キャリブレーション装置及び方法を提供することにある。

【0024】本発明の更なる目的は、1枚の撮像画像を基に安定且つ高精度にパラメータ推定を行うことができる、優れたカメラ・キャリブレーション方法及び装置を提供することにある。

【0025】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記課題を参

照してなされたものであり、その第1の側面は、カメラの特性を表すパラメータを算出するカメラ・キャリブレーション装置又は方法において、幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力手段又はステップと、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持手段又はステップと、前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出手段又はステップと、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーション装置又は方法である。

【0026】本発明の第1の側面に係るカメラ・キャリブレーション装置又は方法は、さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段又はステップを含み、前記画像保持手段又はステップは、前記画像生成手段又はステップによって生成された画像を保持するようにしてもよい。

【0027】また、本発明の第1の側面に係るカメラ・キャリブレーション装置又は方法は、さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段又はステップと、該生成された基準画像を略無地の面上に投影する投光手段又はステップとを含み、前記画像入力手段又はステップは、前記投光手段又はステップによる投影画像をカメラで撮像した撮像画像を入力するようにしてもよい。

【0028】本発明の第1の側面に係るカメラ・キャリブレーション装置又は方法において、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとるようにしてもよい。

【0029】また、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、射影変換パラメータを導出するとともに、該射影変換パラメータを用いて撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとり、両画像の対応する画素間の輝度誤差を画像全体で最小化するようにしてもよい。

【0030】また、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、カメラによる撮像時に生じる前記撮像画像の歪み要因を表す歪みパラメータを導出するとともに、該歪みパラメータを用いて歪みを除去した撮像画像を射影変換して、前記基準画像との対応をとるようにしてもよい。

【0031】また、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、前記撮像画像の輝度値に応じて前記基準画像の輝度値を補正するようにしてもよい。この場合、撮像画像中において輝度値が略同一な領域を抽出して該領域の輝度値の平均値を求め、基準画像中の対応画素の輝度値を該平均値で置き換えることによって、好適に補正することができる。

【0032】また、本発明の第2の側面は、カメラによる複数の撮像画像を処理するための画像処理装置又は方

法であって、幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力手段又はステップと、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持手段又はステップと、前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出手段又はステップと、該算出された変換パラメータを用いて、前記カメラが撮像した複数の撮像画像間における画素の対応関係を求める演算手段又はステップと、を具備することを特徴とする画像処理装置又は方法である。

【0033】本発明の第2の側面に係る画像装置又は方法は、さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段又はステップを含み、前記画像保持手段又はステップは、前記画像生成手段又はステップによって生成された画像を保持するようにしてもよい。

【0034】また、本発明の第2の側面に係る画像処理装置又は方法は、さらに、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を該定義に従って生成する画像生成手段又はステップと、該生成された基準画像を略無地の面上に投影する投光手段又はステップを含み、前記画像入力手段又はステップは、前記投光手段又はステップによる投影画像をカメラで撮像した撮像画像を入力するようにしてもよい。

【0035】本発明の第2の側面に係る画像処理装置又は方法において、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、撮像画像又は基準画像のいずれか一方を画像変換して他方の画像との対応をとるようにしてもよい。

【0036】また、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、射影変換パラメータを導出するとともに、該射影変換パラメータを用いて撮像画像又は基準画像のいずれかを画像変換して他方の画像との対応をとる、両画像の対応する画素間の輝度誤差を画像全体で最小化するようにしてもよい。

【0037】また、前記演算手段又はステップは、前記カメラが撮像した2枚の撮像画像に関して、一方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換と、他方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換の逆変換とを用いて座標変換することにより、該2枚の撮像画像間の対応関係を求めるようにしてもよい。この場合、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、カメラによる撮像時に生じる前記撮像画像の歪み要因を表す歪みパラメータを導出するとともに、該歪みパラメータを用いて歪みを除去した撮像画像を射影変換して、前記基準画像との対応をとればよい。

【0038】また、前記変換パラメータ算出手段又はステップは、前記撮像画像の輝度値に応じて前記基準画像の輝度値を補正するようにしてもよい。この場合、撮像画像において輝度値が略同一な領域を抽出して該領域の輝度値の平均値を求め、基準画像中の対応画素の輝度

値を該平均値で置き換えることによって、好適に補正することができる。

【0039】また、前記画像入力手段又はステップは、互いに所定の位置関係を持つ複数のカメラで撮像された複数の撮像画像を入力してもよい。

【0040】また、本発明の第3の側面は、カメラの特性を表すパラメータを算出するカメラ・キャリブレーションをコンピュータ・システム上で実行せしめるためのコンピュータ・プログラムを有形的且つコンピュータ可読な形式で提供するコンピュータ可読プログラム提供媒体であって、前記コンピュータ・プログラムは、幾何形状が定義済みのパターンをカメラで撮像した撮像画像を入力する画像入力ステップと、前記幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像保持ステップと、前記撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出ステップと、を含むことを特徴とプログラム提供媒体である。

【0041】また、本発明の第4の側面は、撮像画像を入力する画像入力手段と、幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を保持する画像生成手段と、前記幾何形状が定義済みのパターンを前記画像入力手段において入力した撮像画像と前記基準画像間の画素の対応関係に基づいて変換パラメータを算出する変換パラメータ算出手段と、を具備することを特徴とするカメラ・キャリブレーションを行うことが可能なカメラである。

【0042】

【作用】本発明では、計算機内で合成したパターンすなわち基準画像に対して、カメラで実写した撮像画像を合わせ込むことによって、カメラのパラメータ算出すなわちキャリブレーションを行うこととした。

【0043】キャリブレーションに用いる撮像画像は、幾何形状が既知のキャリブレーション・パターンをカメラで撮像することにより、画像入力される。画像入力された撮像画像は、例えばカメラ・キャリブレーション装置内のフレーム・バッファに一時格納される。

【0044】他方、キャリブレーション・パターンとは幾何形状の定義と一般的にパターンを持つ基準画像は、カメラ・キャリブレーション装置内の他のフレーム・バッファに保持されている。カメラ・キャリブレーション装置は、予め作成されたパターンを含む基準画像をハード・ディスクのような外部記憶装置に蓄積しておき、該ディスクから取り出してフレーム・バッファに書き込むのもよい。

【0045】あるいは、幾何形状の定義に従って、コンピュータ・グラフィックス技術を用いてカメラ・キャリブレーション装置内部で基準画像を生成して、フレーム・バッファ内に一時格納するようにしてもよい。要するに、フレーム・バッファに書きこまれた基準画像は、理論的な幾何形状に合致する完全なパターンを有するもの

と理解されたい。

【0046】また、撮像画像すなわちカメラによる実写に用いられるパターンは、印刷などによって平面上に恒久的に形成されたパターンである必要はなく、コンピュータ・グラフィックスにより生成された基準画像を投光手段（例えば、スライド）によって平面上に投影されたパターンであってもよい。この場合、基準画像と撮像画像間におけるキャリブレーション・パターンの幾何形状の一義性は、比較的容易に保たれる。

【0047】このようにして得られた基準画像と撮像画像間で、画像合わせ込み（Image Registration）を行い、精度の誤差を最小化することで、パラメータ算出を行うことができる。

【0048】したがって、本発明に係るカメラ・キャリブレーション装置及び方法によれば、1枚の撮像画像を用いてパラメータ推定を安定且つ精度よく行うことができる。

【0049】また、カメラが撮像するパターンは、計算機内において基準画像のパターン合成に用いる幾何形状の定義と一義的である必要があるが、撮像物体までの距離やパターンの大きさは全く限定されない。何故ならば、距離の大小に伴う撮像パターンの縮尺や撮像方向の相違などは、射影変換を行うことにより吸収することが可能だからである。射影変換は、コンピュータ資源を用いた演算処理で比較的容易に実現される。

【0050】本発明によれば、局所的な特徴点を用いずに処理を行うことができるので、特徴点抽出の誤差などによるパラメータ推定への影響がなく、また、カメラで撮像した画像のノイズの影響を抑制することができる。さらに、1枚の撮像画像を用いて安定したパラメータ算出を行うことができる。

【0051】また、キャリブレーションに用いるパターンは、計算機内で生成が可能な単純な図形の組み合わせ（例えば、白黒2色の市松模様、2値の3角形の組み合わせなど）であれば十分である。かかるパターンを撮像する際は、合成したパターンと同一のパターンを持つ平面を用意する必要があるが、カメラまでの距離やパターンの大きさを同一にする必要はないので、キャリブレーションを行うための制約が少なくて済む。また、スライドなどを用いて投影したパターンを無地の平面に投影した画像を撮像して、キャリブレーションを行うこともできる。

【0052】また、キャリブレーションに既知すなわち幾何形状が定義済みのパターンを用いるため、例えば精度補正など前処理のアルゴリズムを構築し易い。逆に、前処理のアルゴリズムを構築し易いようなパターンを利用して、キャリブレーションを行うようにデザインすればよい。

【0053】本発明に係るカメラ・キャリブレーションによれば、歪みパラメータの算出と同時に、合成画像と

撮像画像の対応を示す射影変換行列を算出することができるので、ステレオ法のためのキャリブレーションに対しても適用可能である。すなわち、カメラが撮像した2枚の撮像画像に関して、一方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換と、他方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換の逆変換とを用いて座標変換することによって、2枚の撮像画像間の対応関係を求めることができるのである。

【0054】例えば、本出願人に既に譲渡されている特願9-207948号や特願9-207951号の各々の明細書は、ステレオ法に基づく画像処理装置や画像処理方法について開示しているが、これらの画像処理装置等に対して本発明を適用することも可能である。

【0055】本発明の第3の側面に係るプログラム提供媒体は、例えば、様々なプログラム・コードを実行可能な汎用コンピュータ・システムに対して、コンピュータ・プログラムを有形的且つコンピュータ可読な形式で提供する媒体である。媒体は、CD（Compact Disc）やFD（Floppy Disc）、MO（Magnetooptical Disc）などの着脱自在で可搬性の記憶媒体、あるいは、ネットワークなどの伝送媒体など、その形態は特に限定されない。

【0056】このようなプログラム提供媒体は、コンピュータ・システム上で所定のコンピュータ・プログラムの機能を実現するための、コンピュータ・プログラムと提供媒体との構造上又は機能上の協働関係を定義したものである。換言すれば、本発明の第7乃至9の各側面に係るプログラム提供媒体を介して所定のコンピュータ・プログラムをコンピュータ・システムにインストールすることによって、コンピュータ・システム上では協働的作用が発揮され、本発明の第1の側面と同様の作用効果を得ることができるのである。

【0057】本発明のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する本発明の実施例や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかにされるであろう。

【0058】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら本発明の実施例を詳解する。

【0059】まず、本発明の実施に供されるカメラ・キャリブレーション・システム10の構成について説明する。カメラ・キャリブレーション・システム10は、カメラからの入力画像の処理のために特化してデザインされた専用ハードウェアとして構成することも、あるいは、汎用コンピュータ・システム上で撮像画像の処理を実行する所定のアプリケーション・プログラムを実行するという形態でも具現することも可能である。

【0060】図1には、カメラ・キャリブレーション・システム10のハードウェア構成を模式的に示している。以下、各部について説明する。

【0061】演算処理部11は、画像処理システム10

全体の動作を統括的に制御するメイン・コントローラであり、その実体は、画像処理を実行する所定のアプリケーション・プログラムを起動するCPU (Central Processing Unit) である。すなわち、演算処理部11は、オペレーティング・システム (OS) の制御下で、各種のアプリケーション・プログラムを実行する。演算処理部11は、例えば、以下の画像処理を実行する。

(1) 所定のコンピュータ・グラフィックス処理を実行して、幾何形状が定義済みのパターンからなる基準画像を生成し、フレーム・メモリ14に格納する。

(2) カメラ (後述) の撮像画像と基準画像間の画素の対応関係に基づいて、カメラの変換パラメータを算出する。パラメータ算出の際、2枚の画像間の画像合わせ込み (Image Registration) 処理も行う。

(3) 算出した変換パラメータを用いて、カメラが撮像した複数枚の撮像画像間における画素の対応関係を求める。例えば、基準カメラ17Aと参照カメラ17Bの双方における観測点の対応関係に基づいて、ステレオ法による距離測定を行う。

【0062】RAM (Random Access Memory) 12は、演算処理部11が実行プログラム・コードをロードしたり、作業データを一時格納するために使用される書き込み可能なメモリである。例えば、カメラ・キャリブレーションを含む各種の演算処理に必要なプログラム・コードやデータは、RAM12上にロードされる。RAM12は、通常、複数個のDRAM (Dynamic RAM) チップで構成される。また、ROM (Read Only Memory) 13は、製造時に格納データが恒久的に書き込まれる読み出し専用の不揮発メモリである。ROM13上には、例えば、システム10の電源投入時に行われる自己診断テスト・プログラム (POST) や、ハードウェア入出力操作を実行するためのコード群 (BIOS) が格納されている。

【0063】フレーム・メモリ14は、演算処理部11において生成された基準画像 (前述) を一時的に格納するためのバッファ・メモリである。但し、フレーム・メモリ14は、RAM12とは独立したメモリである他、RAM12内に設けられた専用パーティションであってもよい。

【0064】入力部15は、ユーザからのコマンド入力などを受容する装置である。キャラクタ・ベースでコマンド入力を行うキーボードや、座標指示形式でコマンド入力を行うマウスやタッチパネルなどの装置がこれに含まれる。

【0065】表示部16は、処理画像やコマンド入力のためのメニューなどを含んだ作業画面をユーザに提示するための装置であり、CRT (Cathode Ray

Tube: 陰極線管) ディスプレイやLCD (Liquid Crystal Display: 液晶表示ディスプレイ) がこれに該当する。

【0066】カメラ17A及び17Bは、3次元空間上に実在する物体を撮像して、電子的な画像データとして取り込むための装置であり、カメラ・インターフェース18を介してシステム10に接続される。カメラ17A及び17Bは、インターフェース18に対して着脱自在であってもよい。本実施例のカメラ17A及び17Bは、ピンホールカメラ・モデルに従う中心投影 (前述) により物体を撮像するものとする。

【0067】これら2台のカメラ17A及び17Bは、互いの位置関係が固定されており、ステレオ・ペアを構成する。すなわち、一方のカメラ17Aを基準カメラとして、他方のカメラ17Bを参照カメラとして用いることで、ステレオ法に基づく物体の距離測定を行うことができる (ステレオ法の原理については【従来の技術】の欄を参照のこと)。各カメラ17A及び17Bの撮像カメラは、フレーム・メモリ19に一時的に格納される。撮像画像は、例えば、所定のファイル形式 (例えば、拡張子".bmp" を持つビットマップ形式) で、外部記憶装置20 (後述) に蓄積することができる。

【0068】本実施例では、スクリーン平面上には、基準画像 (前述) に含まれるパターンと同一幾何形状の定義を持つキャリブレーション・パターンが形成されている。カメラ17A及び17Bでこのキャリブレーション・パターンを撮像した撮像画像の各々を、フレーム・メモリ14上に格納された基準画像と画像合わせ込み (Image Registration) が行われる (後述)。

【0069】但し、カメラ・キャリブレーション・システム10は、必ずしも2基のカメラを備え、ステレオ法を実現する必要はない。例えば、システム10は、単一のカメラ17Aのみを備え、単一のカメラのキャリブレーションを行うシステムであってもよい。

【0070】外部記憶装置20は、例えば、ハード・ディスク・ドライブ (HDD) のような、比較的大容量で再書き込み可能且つ不揮発の記憶装置であり、データ・ファイルを蓄積したり、プログラム・ファイルをインストールするために使用される。データ・ファイルの例は、基準画像中のキャリブレーション・パターンを生成するための幾何形状データ・ファイルなどである。また、プログラム・ファイルの例は、演算処理部11において実行される3次元グラフィック・アプリケーションや、カメラのキャリブレーション処理を行うためのアプリケーションなどである。

【0071】メディア・ドライブ21は、カートリッジ式のメディアを交換可能に装填して、メディア表面上の所持データを読み書きするための装置である。ここで言うメディアとして、MO (Magnetic-Optic

al disc)、CD-ROM、DVD (Digital Versatile Disc) などの、システム10から着脱自在で可搬型のメディアが挙げられる。基準画像中のキャリブレーション・パターンを定義する幾何形状データ・ファイルや、カメラ・キャリブレーション処理等のためのプログラム・ファイルは、この種のメディアを媒介として流通され、メディア・ドライブ15によって外部記憶装置20にインストールすることができる。

【0072】投光器22は、スクリーン平面上に所望のパターンを投影するための装置であり、投光器インターフェース23によってシステム10に接続されている。投光器22は、例えば、演算処理部11によって生成された基準画像をフレーム・メモリ14から取り出して、スクリーン平面上に投影することができる。この場合、投影された基準画像そのものを実写のためのキャリブレーション・パターンとして使用可能であり、スクリーン上にパターンを印刷などにより形成する必要がなくなる。

【0073】ネットワーク・インターフェース24は、カメラ・キャリブレーション・システム10を所定の通信プロトコル（例えば、TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) プロトコル）に従ってネットワーク接続するための装置である。ネットワーク上には、複数のコンピュータ・システム（以下では、「リモート・システム」とも呼ぶ；図示しない）が存在する。本実施例のカメラ・キャリブレーション・システム10は、リモート・システムからネットワーク経由で、基準画像中のキャリブレーション・パターンについての幾何形状データ・ファイルや、カメラ・キャリブレーションのためのプログラム・ファイルなどの供給を受けられることもできる。

【0074】なお、カメラ・キャリブレーション・システム10を実際に構成するためには、図1に示した以外にも多くのハードウェア・コンポーネントが必要である。但し、これらは当業者には周知であり、また、本発明の要旨を構成するものではないので、本明細書中では省略している。また、図面の錯綜を回避するため、図中の各ハードウェア・ブロック間の接続も抽象化して図示している点を承知されたい。（例えば、演算処理部11を構成するCPUは、一般には、各周辺機器を自己の外部ピンにローカル接続せず、各種の入出力インターフェースを介してバス接続する。）

【0075】次いで、単一のカメラ17A又は17B（以下では、便宜上、カメラ17Aのみとする）についての歪みパラメータの算出、すなわちカメラ・キャリブレーションの処理手順について説明する。ここで言う歪みパラメータとは、歪み中心（ c_x, c_y ）、歪み係数 k 、アスペクト比（画素の縦横比） s_x のことを指す。

また、射影変換行列Hは、演算処理部11によって合成された基準画像I₀と、カメラ17Aによって撮像された撮像画像I₁の間の対応関係を記述するものとする。また、以下に示す処理手順では、撮像画像から基準画像への変換を基に説明しているが、逆方向への変換についても、本発明に係るパラメータ算出は可能である。

【0076】まず、パターンが形成された平面を、カメラ17Aによって撮像する。撮像した濃淡画像I₁は、フレーム・メモリ19に一時的格納される。平面上に形成されたパターンは、キャリブレーションに用いるキャリブレーション・パターンであり、その幾何形状は既知である。また、パターンは、平面上に印刷などにより形成される必要はなく、例えば投光器22を用いて、フレーム・メモリ14上の基準画像を投影したものであってもよい。

【0077】キャリブレーション・パターンは、幾何形状が既知であれば特にパターンの形状や寸法や色彩は限定されない。計算機内での生成処理（後述）が容易な、単純な基本図形の組み合わせであれば充分である。キャリブレーション・パターンは、例えば、図2に示すような、白黒2値の市松模様や、2値の3角形の組み合わせでもよい。また、撮像対象は、合成された基準画像と幾何形状の定義と一義的なパターンを含む必要があるが、カメラ17Aまでの距離やパターンの大きさに関する限定はない。

【0078】次いで、各フレーム・バッファ14、19に蓄積された基準画像I₀と撮像画像I₁の双方を用いて歪みパラメータの算出処理が行われる。図3には、この歪みパラメータの算出処理の手順をフローチャートの形式で概略的に示している。該処理手順は、例えば、演算処理部11が所定のプログラム・コードを実行するという形式で具現化される。以下、図示のフローチャートを参照しながら説明する。

【0079】まず、演算処理部11では、幾何形状の定義に基づいてキャリブレーション・パターンをコンピュータ内部で合成して、この合成画像を基準画像I₀としてフレーム・メモリ14に格納する（ステップS10）。

【0080】次いで、基準画像I₀と撮像画像I₁間の対応関係の初期値を設定する（ステップS20）。この対応関係は、射影変換行列Hによって記述される。但し、このステップでは、カメラ17Aのレンズ歪みについては考慮せず、2枚の画像間の対応を設定するだけでよい。初期値としては、4点以上の対応点の設定が可能であればよく、設定方法を特に限定する必要はない。

【0081】次いで、基準画像I₀と撮像画像I₁の間で輝度補正を行う（ステップS30）。計算機内で合成した基準画像I₀が完全な2値画像である。これに対して、2値のパターンで構成されるキャリブレーション・パターン（図2を参照のこと）をカメラ17Aで実写し

て得た撮像画像 I_d は、通常、照明条件などの影響により濃淡画像となる。そこで、画像合わせ込み処理（後述）を効率的且つ高精度に行うために、撮像画像 I_d 及び基準画像 I_o の各々の輝度分布を補正してパラメータ算出を行うことが好ましい。但し、輝度補正処理は、歪みパラメータ算出に必須の要件ではない。輝度補正処理の詳細については後述に譲る。

【0082】ここで、システム10内の計算処理により合成された基準画像 I_o と、カメラ17Aの撮像画像 I_d との対応関係について、図4を参照しながら説明する。これら2枚の画像間の対応付けは、射影変換行列 H と歪みパラメータ (c_x, c_y, k, s_x) とで表される。

【0083】パラメータ推定の際に使用するレンズ歪みを考慮したカメラ・モデルによる撮像画像平面上の点を $n_d = [x_d, y_d]^T$ とし、レンズ歪みを考慮しない撮像画像平面上の対応する点 $n_u = [x_u, y_u]^T$ とすると、各点 n_d 及び n_u の間には以下の関係が成立する。

【0084】

【数2】

$$\begin{aligned} x_u &= x_d + (x_d - c_x) \kappa_d^2 \\ y_u &= y_d + (y_d - c_y) \kappa_d^2 \end{aligned} \quad \dots (1)$$

【0085】但し、上式において、 r_d は歪み中心 *

$$\begin{aligned} x_o &= \frac{h_{11}x_u + h_{12}y_u + h_{13}}{h_{31}x_u + h_{32}y_u + h_{33}} \\ y_o &= \frac{h_{21}x_u + h_{22}y_u + h_{23}}{h_{31}x_u + h_{32}y_u + h_{33}} \end{aligned}$$

【0091】上式(1)及び(4)により、基準画像 I_o 上の点 $n_o = [x_o, y_o]^T$ と撮像画像 I_d 上の点 $n_d = [x_d, y_d]^T$ との間には以下の関係が成立する。※

$$\begin{aligned} x_o &= \frac{h_{11} \{ x_d + (x_d - c_x) \kappa_d^2 \} + h_{12} \{ y_d + (y_d - c_y) \kappa_d^2 \} + h_{13}}{h_{31} \{ x_d + (x_d - c_x) \kappa_d^2 \} + h_{32} \{ y_d + (y_d - c_y) \kappa_d^2 \} + h_{33}} \\ y_o &= \frac{h_{21} \{ x_d + (x_d - c_x) \kappa_d^2 \} + h_{22} \{ y_d + (y_d - c_y) \kappa_d^2 \} + h_{23}}{h_{31} \{ x_d + (x_d - c_x) \kappa_d^2 \} + h_{32} \{ y_d + (y_d - c_y) \kappa_d^2 \} + h_{33}} \end{aligned} \quad \dots (6)$$

【0093】再び図3に戻って、パラメータ算出の手順について説明する。同図に示すように、ステップS40では、カメラ17Aのレンズ歪みパラメータの推定を行う。

【0094】本実施例では、歪みパラメータの推定は、いわゆる画像合わせ込み (Image Registration)

$$E = \sum_i \| I_o(x_o, y_o) - I_d(x_d, y_d) \|^2 = \sum_i c_i^2 \quad \dots (6)$$

【0096】この最小化に関しては、Levenberg-Marquardt 最小化法（以下では、単に「L-M法」とする）を適用することができる。例えば、S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery 著の "NU

* (c_x, c_y) からの距離のことであり、次式で定義される。

【0086】

【数3】

$$r_d = \sqrt{\left(\frac{x_d - c_x}{s_x} \right)^2 + (y_d - c_y)^2} \quad \dots (2)$$

【0087】また、基準画像 I_o 上の点を $n_o = [x_o, y_o]^T$ とおくと、 n_o が画像平面上の点であることから、 n_o から n_u への変換は射影変換行列 H を用いて次式のように表される。

【0088】

【数4】

$$\begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (8)$$

【0089】ここで、射影変換行列 H は 3×3 マトリックスの行列であることから、基準画像 I_o 上の点 $n_o = [x_o, y_o]^T$ は、行列 H の各係数 h_{ij} を用いて次式のように表すことができる。

【0090】

【数5】

※

【0092】

【数6】

★ation）技術を用いて行う。実際には、次式に示すように、基準画像 I_o と撮像画像 I_d との輝度誤差の2乗和を最小化することで、各パラメータ $[h_{11}, h_{12}, \dots, h_{32}, h_{33}, c_x, c_y, k, s_x]$ の推定を行う。

【0095】

【数7】

MERICAL RECIPES in C" (W. H. Press) には、L-M法について記載されている。

【0097】射影変換行列の自由度は8であることから、上記したパラメータのうち h_{33} は1としてパラメー

タ推定は行わないため、未知パラメータ数 $k=12$ とする。また、以下では、説明の便宜上、 $[h_{11}, h_{12}, \dots, h_{32}, c_x, c_y, \kappa, s_x] = [m_1, m_2, \dots, m_{11}, m_{12}]$ と表記することとする（すなわち h_{33} を算出パラメータから取り除く）。

【0098】L-M法に従うアルゴリズムでは、未知のパラメータ m_k の各々についての偏微分を用いる。誤差 e_l の各未知パラメータに関する偏微分は次式のように表される。

【0099】

【数8】

$$\frac{\partial e_l}{\partial m_k} = \frac{\partial x_0}{\partial x_0} \cdot \frac{\partial x_0}{\partial m_k} + \frac{\partial y_0}{\partial y_0} \cdot \frac{\partial y_0}{\partial m_k} \quad \dots (7)$$

【0100】但し、上式(7)において、 $(\partial x_0 / \partial x_0, \partial y_0 / \partial y_0)$ は点 (x_0, y_0) での輝度勾配を表す。未知パラメータに関する偏微分から、L-M法では近似Hessian Matrix α とWeighted gradient Vector β を計算する。それぞれの構成要素は以下の各式の通りである。

【0101】

【数9】

$$\alpha_{kl} = \sum_i \frac{\partial e_i}{\partial m_k} \cdot \frac{\partial e_i}{\partial m_l} \quad \dots (8)$$

$$\beta_k = -2 \sum_i e_i \frac{\partial e_i}{\partial m_k} \quad \dots (9)$$

【0102】各繰り返し段階において、上記の各未知パラメータ m_k をそれぞれ Δm_k だけ更新する。

【0103】

【数10】

$$\Delta m = (\alpha + \lambda I)^{-1} \beta \quad \dots (9)$$

【0104】上式(9)において、 λ は $\text{time-varying stabilization parameter}$ である。誤差 e_l が充分小さくなるまで更新 Δm_k を繰り返し行うことで、未知パラメータの各々を推定することができる。実際の画像合わせ込み手順を以下に示しておく。

【0105】(処理1) 撮像画像 I_d 上の各画素 $n_{di} = [x_{di}, y_{di}]^T$ に対して、

①基準画像 I_o 上の対応する点 $n_o = [x_o, y_o]^T$ を、式(5)を用いて算出する。

②撮像画像 I_d 及び基準画像 I_o の対応する画素間の輝度誤差 e_l と輝度勾配 $(\partial x_0 / \partial x_0, \partial y_0 / \partial y_0)$ を計算する。

③未知パラメータ m_k の各々に関する偏微分を、式(7)に従って算出する。

④ α 及び β を、式(8)に従って計算する。

(処理2) 式(9)に示したシステム方程式を解き、未

知パラメータ m_k の各々を Δm_k だけ更新する（但し、 $k=1, 2, \dots, 12$ ）。

(処理3) 式(6)に示した輝度誤差の2乗和が増加した場合、パラメータ λ を10倍して、(処理2)に戻る。増加しなかった場合は、 λ を1/10倍して、(処理1)に戻る。

【0106】以上の処理により、各画素パラメータの推定を行うことができる。前述したように、ステップS30において各画像 I_o 及び I_d 間で輝度補正を前処理として行うことにより、パラメータ推定を効率化することができる。何故ならば、輝度補正を行うことで、画像合わせ込みの際に、輝度誤差の収束や局所解の回避などの効果が期待されるからである。

【0107】輝度補正方法の一例を、図5を参照しながら以下に説明しておく。但し、図示の通り、白黒2値の市松模様からなるキャリブレーション・パターンを用いるものとし、また、基準画像 I_o と撮像画像 I_d に関して4点以上の対応点が与えられているものとする。画像間の対応関係を記述する初期射影変換行列 H_o は、その自由度が8であることから、4点以上の対応関係により、全ての成分を算出することができる（但し、この段階では、歪みパラメータを考慮していない）。

【0108】まず、基準画像 I_o 上の各図形パターンの中心位置を設定する。基準画像 I_o 中に含まれるキャリブレーション・パターンはシステム10内の計算処理により生成されたパターンであることから、周知の画像処理技術を適用することで中心位置の設定を容易に実現できる点を理解されたい。図5(a)の各図形パターン上に描かれた十字の交差点が設定された中心位置を表すものとする。

【0109】次いで、初期射影変換行列 H_o を用いて、基準画像 I_o 上の各設定点 n_o に対応する撮像画像上の点 n_d を算出する。そして、基準画像 I_o における設定点が属する図形の輝度値を点 n_d の輝度値で置き換える。あるいは、単純に輝度値を置き換えるのではなく、撮像画像 I_d についても予め各図形パターンごとにラベル付けをし、各輝度値の平均値を用いてもよい。

【0110】これまでは、単一のカメラ17Aに対しての歪みパラメータ推定について説明してきた。以下では、カメラ17A及び17Bからなるステレオ・ペアに対して上記の歪みパラメータ推定方法を適用する場合について説明することにする。

【0111】図6には、ステレオ・ペアを構成する基準カメラ17Aと参照カメラ17Bの各々が、白黒2値の市松模様状のテキストチャ付き平面を撮像する様子を示している。基準カメラ17Aと参照カメラ17Bの位置関係は固定されているものとする。

【0112】図7には、ステレオ・ペアが撮像する様子を上面から眺望した様子を示している。このステレオ空間上には、撮像平面の距離を計測する原点位置があるの

ものとする。撮像平面を原点に対する距離 Z_0 に設置した場合、基準カメラ 17 A の視線と撮像平面との交点 P_0 は、基準カメラ 17 A の撮像画像 1 A 上では点 n_0 として観察されるが、参照カメラ 17 B の撮像画像 1 B 上では点 n_{00} として観察される。また、撮像平面を距離 Z_1 に設置した場合、基準カメラ 17 A の視線と撮像平面との交点 P_1 は、基準カメラ 17 A の撮像画像 1 A 上では同一の点 n_0 として観察されるが、参照カメラ 17 B の撮像画像 1 B 上では他の点 n_{01} として観察される。

【0113】撮像画像 1 A と 1 B とを重ね合わせるときに、輝度の誤差が最小となるような射影変換行列 H_{trans0} を、画像合わせ込み (Image Registration) によって計算することができる。同様にして、撮像画像 1 A と 1 B とを重ね合わせるときに輝度の誤差が最小となるような射影変換行列 H_{trans1} を、画像合わせ込み (Image Registration) によって計算することができる。

【0114】射影変換行列 H_{trans0} を適用することにより、距離 Z_0 における平面上の任意の点 P_0 についての撮像画像 1 A 上の観察点 n_0 に対する撮像画像 1 B 上の対応点 n_{00} を計算することができる。また、射影変換行列 H_{trans1} を適用することにより、距離 Z_1 における平面上の任意の点 P_1 についての撮像画像 1 A 上の観察点 n_0 に対する撮像画像 1 B 上の対応点 n_{01} を計算することができる。

【0115】基準カメラ 17 A の撮像画像 1 A の観察点 n_0 は、撮像平面が距離 Z_0 及び距離 Z_1 の各々にある場合、参照カメラ 17 B の撮像画像 1 B 上ではそれぞれ点 n_{00} 及び点 n_{01} として観察される。この 2 点 n_{00} 及び点 n_{01} を結ぶ直線がエッジローラインとなる。さらに別の距離にある平面を撮像して、このエッジローライン上の距離方向の補間を行う技術については、例えば、本出願人に既に譲渡されている特願 9-207948 号及び特願 9-207951 号の各明細書に開示されている。

【0116】ステレオ法による距離測定を実現するためには、その前提として、基準カメラ 17 A と参照カメラ 17 B 間の射影変換行列 H_{trans0} 及び H_{trans1} を求める必要がある。これら射影変換行列は、前述の歪みパラメータ推定を用いて求めることができる。図 8 には、この場合の処理手順をフローチャートの形式で示している。以下、このフローチャートを参照しながら説明する。

【0117】まず、演算処理部 11 では、幾何形状の定義に基づいてキャリブレーション・パターンを合成して、この合成画像を基準画像 1 A としてフレーム・メモリ 14 に格納する (ステップ S51)。

【0118】次いで、パターンが形成された平面を、基準カメラ 17 A 及び参照カメラ 17 B によって撮像する。各カメラ 17 A 及び 17 B が撮像した濃淡画像 1 A

及び 1 B は、フレーム・メモリ 19 に一時格納される (ステップ S52)。平面上に形成されたパターンは、キャリブレーションに用いるキャリブレーション・パターンであり、その幾何形状は基準画像 1 A の定義とは一義的である。また、パターンは、平面上に印刷などにより形成される必要はなく、例えば投光器 22 を用いて、フレーム・メモリ 14 上の基準画像を投影したものであってもよい。

【0119】キャリブレーション・パターンは、幾何形状が既知であれば特にパターンの形状や寸法や色彩は限定されない。システム 10 内での合成処理が容易な、単純な基本図形の組み合わせであれば充分である (前述)。ここでは、図 9 に示すような白点 2 値の市松模様のテクスチャ付き平面が用いられているものとする。このテクスチャ付き平面と各カメラ 17 A 及び 17 B までの距離は限定されない。

【0120】次いで、基準画像 1 A と撮像画像 1 B との対応関係の初期値を設定する (ステップ S53 A)。この対応関係は、射影変換行列 H_A によって記述される。但し、この時点では、カメラ 17 A のレンズ歪みについては考慮せず、2 枚の画像間の対応を数値だけでよい。初期値としては、4 点以上の対応点の設定が可能であればよく、設定方法を特に限定する必要はない。

【0121】次いで、画像合わせ込み処理を効率的且つ高精度に行うために、撮像画像 1 A の輝度値を用いて基準画像 1 A の輝度値を補正する (ステップ S54 A)。

【0122】次いで、L-M 法を用いて画像合わせ込み (Image Registration) を行い、射影変換行列 H_A と歪みパラメータ k_A , C_{kA} , C_{YA} を算出する (ステップ S55 A)。但し、 k_A はカメラ 17 A のレンズ歪み係数であり、点 (C_{kA} , C_{YA}) はレンズの歪み中心である。図 9 には、画像合わせ込みを行う様子を図解している。L-M 法の手順の詳細については上述を参照されたい。

【0123】また、他方の参照カメラ 17 B の撮像画像 1 B に対しても、同様に、基準画像 1 A との対応関係の初期値の設定 (ステップ S53 B)、撮像画像 1 B の輝度地を用いた基準画像 1 A の輝度値の補正 (ステップ S54 B)、及び、射影変換行列 H_B と歪みパラメータ k_B , C_{kB} , C_{YB} の算出 (ステップ S55 B) を行う。

【0124】基準カメラ 17 A の撮像画像 1 A から参照カメラの撮像画像 1 B への射影変換行列 H_{trans} は、 $H_A \times H_B^{-1}$ という形で表すことができる (ステップ S57)。この射影変換処理の前後において、歪みパラメータ k_A , C_{kA} , C_{YA} を用いて撮像画像 1 A の歪みを除去する (ステップ S56) とともに、歪みパラメータ k_B , C_{kB} , C_{YB} を用いて撮像画像 1 B 相当の歪みを付加する (ステップ S57)。

【0125】なお、画像合わせ込みを行う際に、それぞれの画像の座標系を一致させる必要がある (すなわち、

カメラ17A及び17Bの各々の撮像画像1a、1aにおいて、対応する正方形が基準画像1oの同じ正方形と合わせて込められる必要がある。そこで、キャリブレーション・パターン中に1箇所（又は数箇所）に特別なパターンを設けて、各画像間の整合をとるようにしてもよい。例えば、図9に示すように、市松模様のテクスチャにおいて黒い正方形の1つを取り除くようにしてもよい。

【0126】[追補]以上、特定の実施例を参照しながら、本発明について詳述してきた。しかしながら、本発明の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施例の修正や代用を成し得ることは自明である。

【0127】例えば、本実施例では、撮像画像から基準画像への変換を行なうことを基にして説明しているが、これには限定されず、逆方向の変換であっても、同様に本発明に係るパラメータ算出を行うことができる。

【0128】すなわち、例示という形態で本発明を開示してきたのであり、限定的に解釈されるべきではない。本発明の要旨を判断するためには、冒頭に記載した特許請求の範囲の欄を参照すべきである。

【0129】

【発明の効果】以上詳記したように、本発明によれば、対象物を撮像して電子的な画像データを出力するタイプのカメラに対して、安定且つ高精度にパラメータ推定を行うことができる、優れたカメラ・キャリブレーション方法及び装置を提供することができる。

【0130】また、本発明によれば、1枚の撮像画像を基に安定且つ高精度にパラメータ推定を行うことができる、優れたカメラ・キャリブレーション方法及び装置を提供することができる。

【0131】本発明では、実際にカメラで撮像した撮像画像に対して、計算機内で合成したパターンすなわち基準画像を合わせ込むことによって、カメラのパラメータ算出すなわちキャリブレーションを行う。すなわち、両画像間の輝度誤差を最小化することで、パラメータ算出を行うことができる。

【0132】本発明によれば、局所的な特徴点を用いずに処理を行うことができるので、特徴点抽出の誤差などによるパラメータ推定への影響がなく、また、カメラで撮像した画像のノイズの影響を抑制することができる。さらに、1枚の撮像画像を用いて安定したパラメータ算出を行うことができる。

【0133】また、キャリブレーションに用いるパターンは、計算機内で生成が可能な単純な図形の組み合わせ（例えば、白黒2色の市松模様、2個の3角形の組み合わせなど）であれば十分である。かかるパターンを撮像する際は、合成したパターンと同一のパターンを持つ平面を用意する必要があるが、カメラまでの距離やパターンの大きさを同一にする必要はないので、キャリブレーションを行うための制約が少なくて済む。また、スライドなどを用いて投影したパターンを無地の平面に投影し

た画像を撮像して、キャリブレーションを行うこともできる。

【0134】また、キャリブレーションに既知すなわち幾何形状が定義済みのパターンを用いるため、例えば輝度補正など前処理のアルゴリズムを構築し易い。逆に、前処理のある後処理アルゴリズムを構築し易いようなパターンを利用してキャリブレーションを行うこともできる。

【0135】また、歪みパラメータの算出と同時に、合成画像と撮像画像の対応を示す射影変換行列を算出することができるので、ステレオ法のためのキャリブレーションに対しても適用可能である。すなわち、カメラが撮像した2枚の撮像画像に関して、一方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換と、他方の撮像画像と基準画像とを対応付ける射影変換の逆変換とを用いて座標変換を求めることができる訳である。

【0136】例えば、本出願人に既に譲渡されている特願9-207948号や特願9-207951号の各明細書は、ステレオ法に基づく画像処理装置や画像処理方法について開示しているが、これらの画像処理装置等に対して本発明を適用することも可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施に供されるカメラ・キャリブレーション・システム10のハードウェア構成を模式的に示した図である。

【図2】本発明に係るカメラ・キャリブレーションに用いられるキャリブレーション・パターンを例示したものである。

【図3】歪みパラメータ推定の処理手順を概略的に示したフローチャートである。

【図4】基準画像1oと撮像画像1aとの対応関係を図解したものである。

【図5】基準画像1a及び撮像画像1a間での輝度補正の処理手順を図解したものである。

【図6】ステレオ・ペアを構成する基準カメラ17Aと参照カメラ17Bの各々が、白黒2値の市松模様状のテクスチャ付き平面を撮像する様子を示した図である。

【図7】ステレオ・ペアを構成する基準カメラ17Aと参照カメラ17Bの各々が平面を撮像する様子、上面から眺望した図である。

【図8】ステレオ・ペアに対して歪みパラメータ推定の処理手順を概略的に示したフローチャートである。

【図9】基準カメラ17A及び参照カメラ17Bの撮像画像1a及び1aを、合成された基準画像1oに合わせ込む様子を示した図である。

【図10】撮像対象に対する基準カメラと参照カメラの配置を模式的に示した図である。

【図11】略正方形のパターンを基準カメラと参照カメラの各々によって撮像した画像を示した図である。

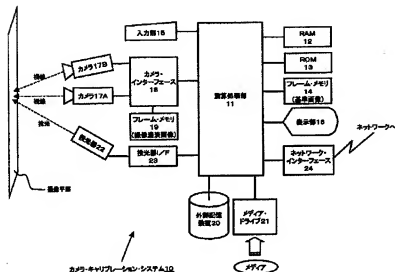
【図12】エッジ・ラインと、参照画像中における

観察点 n_0 の様子を図解したものである。

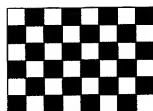
【符号の説明】

- 10…カメラ・キャリブレーション・システム
 11…演算処理部、12…RAM、13…ROM
 14…フレーム・メモリ（基準画像用）
 15…入力部、16…表示部
 17A、17B…カメラ

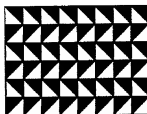
【図1】



【図2】

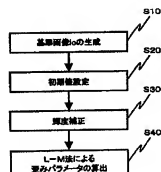


2値の市松模様

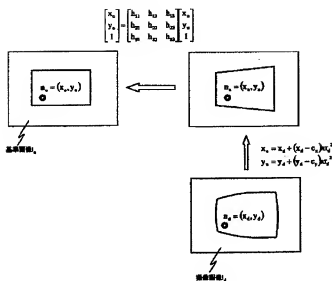


2値の3角形の組み合わせ

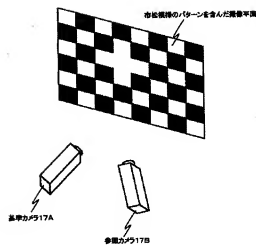
【図3】



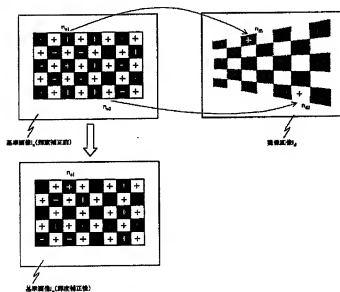
【図4】



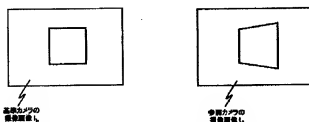
【図6】



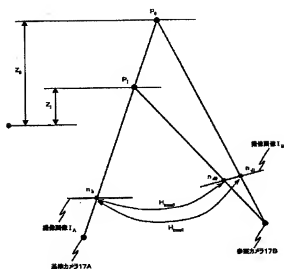
【図5】



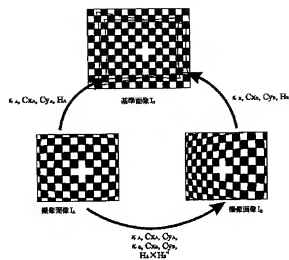
【図11】



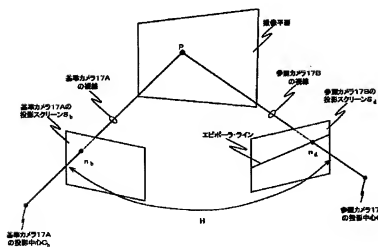
【図7】



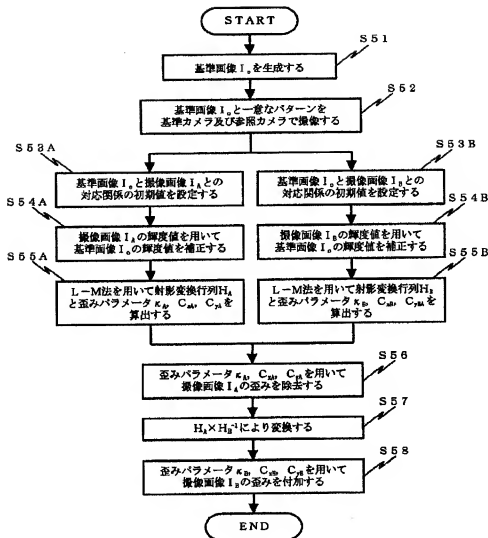
【図9】



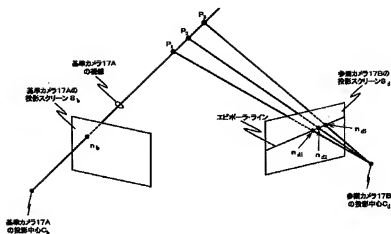
【図10】



【図8】



【図12】



フロントページの続き

F ターム(参考) 5C022 AB15 AB51 AB61 AC03 AC04
 AC69 AC76 CA02
 5C061 AB04 BB03 BB11 CC01
 5L096 AA07 BA08 CA03 CA22 DA02
 EA12 EA26 EA31 FA22 FA32
 FA38 FA42 FA54 FA67 MA03